

# Низкотемпературный отжиг слаболегированных слоев $n$ -4H-SiC после облучения быстрыми электронами

© О.М. Корольков<sup>1</sup>, В.В. Козловский<sup>2</sup>, А.А. Лебедев<sup>3,¶</sup>, Н. Слепчук<sup>1</sup>, J. Toompuu<sup>1</sup>, T. Rang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tallinn University of Technology,  
19086 Tallinn, Estonia

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 21 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 24 февраля 2019 г.

Принята к публикации 24 февраля 2019 г.

Исследовано влияние низкотемпературного (до 600°C) изотермического и изохронного отжига на изменение электрофизических характеристик, облученных JBS диодов Шоттки на основе  $n$ -4H-SiC. Облучение выполнялось электронами с энергией 0.9 МэВ дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Показано, что основное восстановление прямых вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик облученных диодов происходит при температурах отжига до 300°C. При увеличении температуры отжига до 500°C происходит отжиг практически 90% введенных облучением быстрыми электронами радиационных дефектов. Для использования в инженерии радиационных дефектов (Radiation Defect Engineering) рекомендуемые режимы стабилизирующего отжига могут составлять 500°C, 30 мин.

**Ключевые слова:** карбид кремния, облучение электронами, радиационные дефекты, отжиг.

DOI: 10.21883/FTP.2019.07.47879.9089

## 1. Введение

Инженерия радиационных дефектов Radiation Defect Engineering (RDE) находит все более широкое применение в приборной технологии, в частности для компенсации примесной проводимости и создания высокоомных областей в полупроводниковых структурах [1]. Ранее нами была показана возможность создания в  $n$ -SiC с концентрацией доноров  $(4-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  высокоомных слоев с помощью облучения высокоэнергетическими электронами [2,3]. За компенсацию донорной проводимости ответственны ловушки Z1/Z2 и EH6/7, закрепляющие положение равновесного уровня Ферми на глубине  $\sim 1.25 \text{ эВ}$  ниже дна зоны проводимости SiC [2,4]. Термическая стабильность радиационных дефектов в полупроводниках является важнейшим и часто лимитирующим фактором в Radiation Defect Engineering [1]. Особенно для полупроводников, например SiC, приборы на основе которых потенциально способны работать при высоких (до 175°C) температурах. Для  $n$ -SiC долгое время эта тема считалась недостаточно актуальной, так как основные радиационные дефекты Z1/Z2 и EH6/7 отжигаются при температурах  $\sim 1000^\circ\text{C}$  [5-7]. Однако в последнее время стали появляться сообщения, свидетельствующие о некой низкотемпературной нестабильности радиационных дефектов, в частности введенных в  $n$ -4H-SiC (CVD) при облучении быстрыми электронами [8-11]. В представленных ранее работах исследования нестабильности проводились либо при определенной температуре отжига, либо в узком диапазоне температур (см., например, [8]). Целью настоящей

работы — представить панорамную картину влияния температуры и времени отжига на параметры карбид-кремниевых диодов Шоттки, облученных быстрыми электронами.

## 2. Методика эксперимента

В ходе работы проводилось облучение коммерческих диодов Шоттки, производства компании CREE (JBSCPW3-1700-SO10 B) [12]. Активная площадь анодного контакта ( $S = 6.72 \text{ мм}^2$ ), обратное блокирующее напряжение 1700 В, толщина эпитаксиального слоя ( $L = 20 \text{ мкм}$ ), с исходной концентрацией нескомпенсированной примеси  $N_d - N_a$  в  $n$ -слое  $\sim (3-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ проводилось на импульсном ускорителе resonant transformer accelerator (частота импульсов 490 Гц, длительность импульса 330 нс) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 МэВ в SiC составляет  $\sim 1.0 \text{ мм}$ . Средняя плотность тока пучка электронов составляла  $12.5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ . Можно считать, что при электронном облучении дефекты вводились равномерно по объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега электронов. Доза облучения составляла  $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Изохронный отжиг проводился в вакууме в диапазоне температур 100–600°C в течение 30 мин. Изотермический отжиг проводился при 400°C в интервале времени от 10 с до 30 мин, как в вакууме (для минутного диапазона), так и на воздухе

(для секундного диапазона). В качестве нагревателя использовался высокочастотный индуктор (100–180 кГц). Скорость нагрева составляла  $13^\circ/\text{s}$ , скорость охлаждения  $0.35^\circ/\text{s}$ .

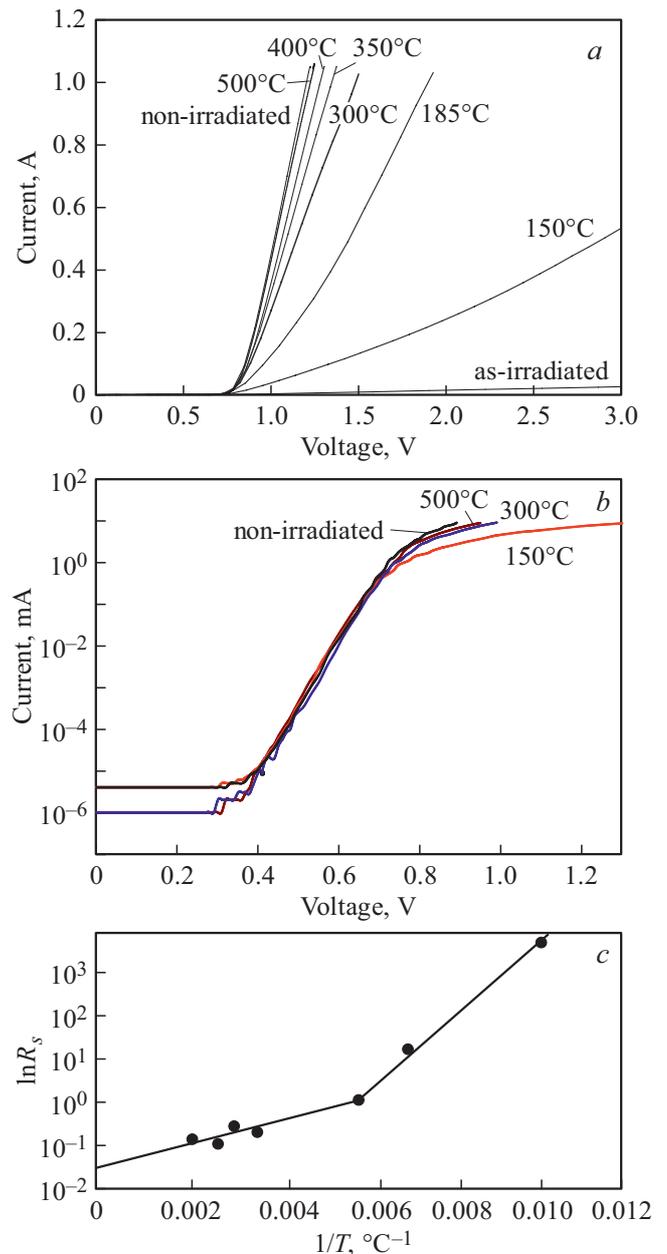
Для измерения параметров диодов использовали а LEMSYS DMS dynamic parameter system, и а KEITHLEY Source Meter 2400. В ходе исследований измерялись прямые вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Измерения  $C-V$ -характеристик проводились при частоте 1 МГц,  $dU/dt = 0.3 \text{ В/с}$ . При измерениях  $I-V$  в пределах 10 мА  $dU/dt = 0.17 \text{ В/с}$ , измерение  $I-V$  в пределах 1 А проводилось при  $dU/dt = 0.5 \text{ В/с}$ .

### 3. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлено влияние температуры отжига на прямые вольт-амперные характеристики диодов для изохронного отжига (время отжига — 30 мин). Как видно из рис. 1, *b*, облучение практически не влияет на зависимость прямого тока от напряжения на экспоненциальном участке зависимости вольт-амперной характеристики. В области больших прямых смещений облучение приводит к резкому возрастанию динамического сопротивления  $R_s$  (рис. 1, *a, c*). При исходном значении  $R_s \sim 0.3 \text{ Ом}$  (при токе 1 А), после облучения значения  $R_s$  увеличиваются до  $\sim 40 \text{ Ом}$ . Поскольку скорость генерации первичных радиационных дефектов (РД) в полупроводнике практически не зависит от уровня его легирования [2,3], мы предполагаем, что динамическое сопротивление  $R_s$  в прямом направлении определяется концентрацией носителей заряда не в сильно легированной подложке, а в слабо легированном  $n$ -слое, т.е. степенью компенсации доноров радиационными дефектами. Начиная с достаточно низких температур отжига ( $150^\circ\text{C}$ ) динамическое сопротивление резко уменьшается. При этом исходя из наклона зависимости  $\ln R_s$  от обратной температуры можно судить об изменении энергии активации перехода нестабильных первичных дефектов в более стабильное состояние. При увеличении температуры отжига выше  $150^\circ\text{C}$  энергия активации процесса резко уменьшается и при дальнейшем увеличении температуры изменяется мало. Как видно из рис. 1, *a* и *b*, основное восстановление ВАХ происходит при температурах до  $300^\circ\text{C}$ . При увеличении температуры отжига до  $500^\circ\text{C}$  происходит отжиг практически 90% введенных облучением быстрыми электронами радиационных дефектов.

Полученные результаты хорошо коррелируют с данными работ [8,13], в которых показано, что отжиг при температурах 400 и 473 К облученных электронами структур уменьшает сопротивление в 2 и 5 раз соответственно. Анализ прямых вольт-амперных характеристик хорошо подтверждается обратными вольт-фарадными характеристиками, о чем можно судить по рис. 2, *a* и *b*.

На рис. 3 представлено влияние времени изотермического отжига при температуре  $400^\circ\text{C}$  на ВАХ диодов. Как видно из рис. 3, *a*, для основного восстановления

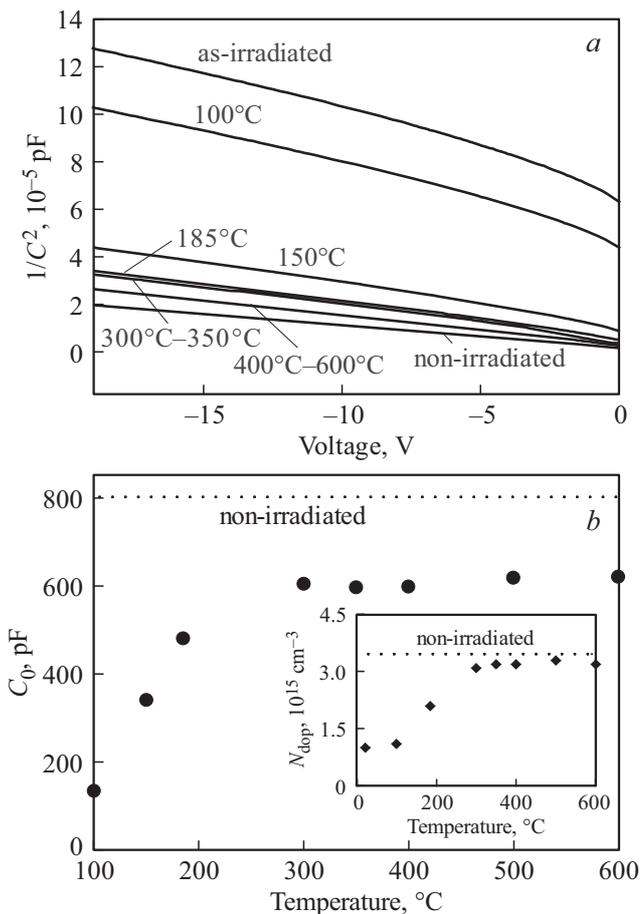


**Рис. 1.** Зависимость прямых вольт-амперных характеристик от температуры отжига. *a* — панорамная картина прямой ветви вольт-амперных характеристик при различных температурах отжига; *b* — прямая ветвь вольт-амперной характеристики в полулогарифмической шкале для предельного тока 10 мА; *c* — зависимость логарифма динамического сопротивления от обратной температуры отжига.

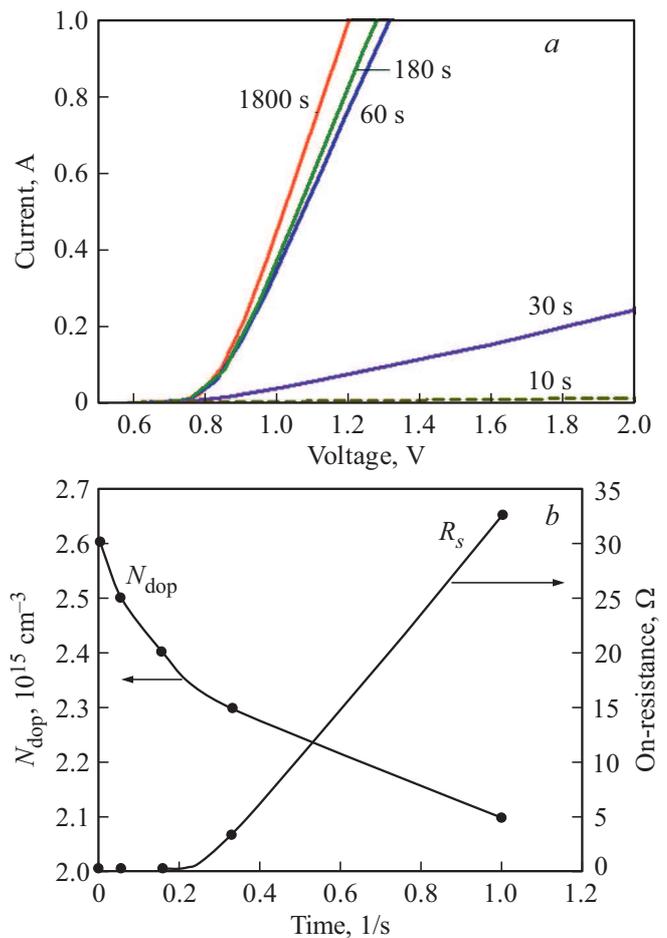
ВАХ и концентрации носителей (рис. 3, *b*) при  $400^\circ\text{C}$  время отжига должно превышать 180 с, процесс восстановления равновесия завершается при 30 минутном отжиге. Дальнейшее увеличение времени отжига до 1.5 ч не привело к изменению  $I-V$ - и  $C-V$ -характеристик. Для удобства измерений ВАХ и ВФХ мы использовали сравнительно небольшие дозы электронного облучения. Доза облучения выбиралась таким образом, чтобы при

известной скорости удаления доноров [14] скомпенсировать не более трети исходной концентрации доноров. Для создания высокоомных слоев следует увеличить дозы облучения примерно на порядок. Рекомендуемые режимы низкотемпературного стабилизирующего отжига могут составлять  $500^{\circ}\text{C}$ , 30 мин. При таких температурах отжига нестабильные дефекты либо отжигаются, либо трансформируются в стабильные Z1/Z2 и EN6/7 центры. Отметим, что аналогично центрам компенсации проводимости происходит и отжиг центров рекомбинации, введенных облучением.

В дополнение к представленным выше результатам можно добавить, что в процессе отжига облученных приборов время обратного восстановления ( $\tau_{rr}$ ) увеличивается от 15 нс для не отожженного образца до 20.7 нс для образца, отожженного при  $500^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин,  $\tau_{rr}$  не облученных образцов составляет 21.5 нс. Измерения  $\tau_{rr}$  проводились в режиме:  $I_F = 20$  А, выключение импульсом обратного напряжения 100 В,  $dI/dt = 100$  А/мкс.



**Рис. 2.** Зависимость вольт-фарадных характеристик от температуры отжига. *a* — панорамная картина вольт-фарадных характеристик при различных температурах отжига; *b* — зависимость барьерной емкости при нулевом смещении от температуры отжига. На вставке показано изменение концентрации носителей в эпитаксиальном слое по мере увеличения температуры отжига.



**Рис. 3.** Зависимость прямых вольт-амперных характеристик от времени отжига. *a* — панорамная картина прямой ветви вольт-амперных характеристик при различной длительности отжига; *b* — зависимость концентрации носителей и динамического сопротивления от обратного времени отжига. Зависимость прямых вольт-амперных характеристик от температуры отжига.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что устранения нестабильных радиационных дефектов, внесенных в  $n$ -4H-SiC облучением быстрыми электронами, необходим отжиг  $500^{\circ}\text{C}$ , 30 мин. При таких температурах отжига нестабильные дефекты либо отжигаются, либо трансформируются в стабильные Z1/Z2 и EN6/7 центры, успешно используемые в инженерии радиационных дефектов (Radiation Defect Engineering). Оперируя энергией, дозами облучения и температурой отжига, можно модулировать выходные параметры прибора либо создавать многослойные конструкции с изоляционными и полупрозрачными слоями. Следовательно, исследования проводимые в области облучения и стабилизирующего отжига позволяют разработать дополнительный инструмент, который можно использовать в технологии изготовления полупроводниковых структур.

### Финансирование работы

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-12-10106. This research was also supported by the Estonian Research Council through the Institutional Research Project IUT19-11, and by the Horizon 2020 ERA-chair Grant „Cognitive Electronics COEL“ — H2020-WIDESPREAD-2014-2 (Agreement number: 668995; project TTU code VFP15051) and by the TAR16013 Center of Excellence „EXCITE IT“. Also supported by the IT Academy Program of Information Technology Foundation for Education.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] V. Kozlovski, V. Abrosimova. *Radiation Defect Engineering. Selected topics in electronics and systems* (Singapore—New Jersey—London—Hong Kong, World Scientific, 2005) v. 37.
- [2] А.А. Лебедев, А.И. Вейнгер, Д.В. Давыдов, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук, В.В. Козловский. *ФТП*, **34**, 897 (2000).
- [3] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, E.V. Bogdanova. *J. Appl. Phys.*, **117**, 155702 (2015).
- [4] П.А. Иванов, А.С. Потапов, М.Ф. Кудояров, М.А. Козловский, Т.П. Самсонова. *Письма ЖТФ*, **44** (6), 11 (2018).
- [5] M. Weidner, T. Frank, G. Pensl, A. Kawasuso, H. Itoh, R. Krause-Rehberg. *Physica*, **308–310**, 633 (2001).
- [6] K. Danno, T. Kimoto. *J. Appl. Phys.*, **100**, 113728 (2006).
- [7] S.A. Reshanov, S. Beljakowa, B. Zippelius. *Mater. Sci. Forum*, **645–648**, 423 (2010).
- [8] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 3780 (2005).
- [9] G. Aleri, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, M.K. Linnarsson. *J. Appl. Phys.*, **98**, 043518 (2005).
- [10] L. Storasta, J.P. Bergman, E. Janzen, A. Henzy. *J. Appl. Phys.*, **96**, 4909 (2004).
- [11] P. Hazdra, S. Popelka. *Mater. Sci. Forum*, **897**, 463 (2017).
- [12] <http://cree.com/>
- [13] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, J.W. Palmour. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 083503 (2017).
- [14] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, А.М. Стрельчук, К.С. Давыдовская, А.Н. Якименко. *Письма ЖТФ*, **43** (22), 63 (2017).

Редактор Г.А. Оганесян

### Low-temperature annealing of lightly doped *n*-4H-SiC layers after irradiation with fast electrons

O.M. Korolkov<sup>1</sup>, V.V. Kozlovsky<sup>2</sup>, A.A. Lebedev<sup>3</sup>, N. Sleptsuk<sup>1</sup>, J. Toompuu<sup>1</sup>, T. Rang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tallinn University of Technology, 19086 Tallinn, Estonia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University, 195251 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The effect of low-temperature (up to 600°C) isothermal and isochronous annealing on the change in the electrophysical characteristics of *n*-4H-SiC-irradiated JBS Schottky diodes was studied. Irradiation was performed by electrons with an energy of 0.9 MeV and a dose of  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . It is shown that the main restoration of the direct current-voltage characteristics (*I*–*V*) and capacitance-voltage characteristics (*C*–*V* characteristics) of irradiated diodes occurs at annealing temperatures up to 300°C. With an increase in the annealing temperature to 500°C, almost 90% of the radiation defects introduced by irradiation with fast electrons are annealed. For use in the engineering of radiation defects Radiation Defect Engineering, the recommended regime of stabilizing annealing can be 500°C, 30 min.